



ARTICLE

Sintesis dan Karakterisasi Hidrogel PVA/GA/POM/CNT, dan Uji Kinerjanya sebagai Material S-CRF CaCl_2 dan S-CRF ZnCl_2

Dita Ayu Rosmawati¹, Hendrawan Hendrawan^{1*}, Hafiz Aji Aziz¹, Yaya Sonjaya¹

¹Prodi Kimia, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudi No.229, Bandung, Indonesia
Koresponden: E-mail: hendrawan@upi.edu

ABSTRAK

Penggunaan pupuk berlebih dalam praktek pertanian berpotensi menimbulkan *leaching* nutrisi berlebih dan dapat mencemari lingkungan. Penggunaan material *Controlled Release Fertilizer* (CRF) berbasis hidrogel menjadi salah satu solusi untuk mengatasi isu tersebut. Mekanisme pelepasan pupuk dari CRF melibatkan penetrasi air ke dalam polimer pembentuk gel dan inti pupuk sehingga nutrisi mampu lepas (*release*) ke tanah secara bertahap pada waktu tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pergerakan ion Ca^{2+} dan Zn^{2+} (sebagai mikronutrien tanaman) dari dalam hidrogel PVA/GA/POM (PGP) dan PVA/GA/POM/CNT (PGPC) ke medium akuades. Hidrogel PGPC disintesis menggunakan prekursor Polivinil Alkohol (PVA) 3%, *crosslinker* glutaraldehid (GA) 1,25%, ekstrak *Premna oblongifolia* Merr. (POM) 1%, dan dispersi *functionalized* MWCNT dengan perbandingan volume 15:7,5:15:7 mL. Karakteristik hidrogel ditentukan berdasarkan hasil pengukuran FTIR, SEM, porositas dan sudut kontak. Pengukuran kinerja hidrogel sebagai CRF dilakukan dengan mengukur *swelling ratio*, *water retention*, serta kemampuan absorpsi dan desorpsi nutrisi secara konduktometri. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa dengan penambahan MWCNT ke dalam campuran prekursor PVA, GA, dan POM tidak terjadi interaksi secara kimia, namun mengubah morfologi hidrogel menjadi lebih kasar dan berpori, meningkatkan sifat hidrofilisitas (penurunan sudut kontak air dari $48,27^\circ$ menjadi $43,68^\circ$), dan porositas (dari 66,85% menjadi 76,71%). Penambahan MWCNT juga mampu meningkatkan nilai *swelling ratio* (dari 673,9% menjadi 966,4%), dan *water retention* (dari 0,18% menjadi 3,53%), tetapi dapat mengurangi kemampuan absorpsi terhadap nutrisi CaCl_2 dan ZnCl_2 . Hasil uji *release* nutrisi mengindikasikan bahwa nutrisi lebih cepat keluar dari hidrogel PGPC dibandingkan PGP, sedangkan pada konsentrasi yang sama ditemukan bahwa CaCl_2 lebih mudah terdesorpsi dari kedua hidrogel dibandingkan dengan nutrisi ZnCl_2 .

Submitted 30 Sept 2025
Revised 10 Nov 2025
Published 30 Nov 2025

Kata Kunci: CaCl_2 ; *Controlled Release Fertilizer*; glutaraldehid; hidrogel; konduktometri; dan ZnCl_2

ABSTRACT

Overuse fertilizer in agriculture practice potentially can cause excess leaching of nutrient and lead the environmental damage. A hydrogel-based *Controlled Release Fertilizer* (CRF) is used to solve these issue. The mechanism of release fertilizer from CRF involves the penetration of water into the gel-forming polymer and fertilizer core, so the nutrients are able to release gradually at certain time. The purpose of this study is to observe the movement of Ca^{2+} and Zn^{2+} ions (as plant's micronutrients) from PVA/GA/POM (PGP) and PVA/GA/POM/CNT (PGPC) hydrogels into aquadest medium. The PGPC hydrogel was synthesized using 3% Polyvinyl Alcohol (PVA), 1,25% glutaraldehyde (GA) as a crosslinker, 1% *Premna oblongifolia* Merr. (POM) extract, and functionalized MWCNT dispersion with the volume ratio 15:7,5:15:7 mL. Hydrogel's characteristics were determined based on the measurement from FTIR, SEM, measurement of porosity, and water contact angle. Hydrogel's performance as a CRF was carried

out by measuring the swelling ratio, water retention, as well as the absorption and desorption ability of nutrients by using the conductometric method. The characterization results showed that by adding MWCNT to the mixture of PVA, GA, and POM precursor did not occur chemical interaction, the morphology of hydrogel became more porous and rough, increase the hydrophilicity (with decrease of water contact angle from 48,27° to 43,68°), and porosity (66,85% to 76,71%). And also, the addition of MWCNT was able to increase the hydrogel's performance in swelling ratio (from 673.9% to 966.4%), water retention (from 0.18% to 3.53%), but can decrease the absorption ability of CaCl₂ and ZnCl₂ nutrient. Nutrient release performance test indicated that nutrients will released more quickly from the PGPC hydrogel than the PGP hydrogel, while at the same concentration it was found that CaCl₂ nutrient was more released easily from both the hydrogel than ZnCl₂ nutrient.

Keywords: CaCl₂; Controlled Release Fertilizer; conductometric; glutaraldehyde, hydrogel; and ZnCl₂

PENDAHULUAN

Saat ini jumlah penduduk di seluruh dunia semakin meningkat, sehingga kebutuhan pangan semakin meningkat dan mendorong produktivitas pertanian global di seluruh dunia untuk meningkatkan hasil panen untuk memenuhi permintaan konsumen [1]. Sehingga banyak petani yang melakukan pemupukan berlebih untuk meningkatkan hasil panen, tetapi hal tersebut nyatanya dapat menurunkan efisiensi penggunaan pupuk serta dapat mendorong masalah lingkungan dan ekologi yang buruk [2]. Penggunaan pupuk yang tidak efisien ini juga mengakibatkan pemborosan bagi petani, lebih dari 800 penelitian menyatakan bahwa rata-rata 51% dari nitrogen tertinggal dipermukaan tanah [3], sekitar 80–90% fosfor, 50–90% kalium dan lebih dari 95% kandungan mikronutrien dari pupuk hilang ke lingkungan dan menyebabkan kerugian ekonomi yang besar [4].

Salah satu solusi yang dapat dilakukan yaitu dengan penggunaan pupuk pelepasan terkendali atau *Controlled Release Fertilizer* (CRF). Dengan penggunaan sistem pelepasan terkendali, unsur hara dapat dilepaskan secara bertahap pada waktu tertentu yang disesuaikan dengan kebutuhan unsur hara spesifik selama pertumbuhan tanaman [5] dan [6]. Material yang biasa digunakan untuk penggunaan CRF yaitu hidrogel. Penggunaan hidrogel sebagai CRF didasarkan pada teknik pelapisan, dengan cara penyerapan zat ke dalam gel, yang kemudian dilepaskan secara perlahan [7]. Hidrogel merupakan polimer bercabang dengan struktur tiga dimensi yang memiliki kapasitas penyerapan air yang sangat baik [8].

Polivinil alkohol (PVA) merupakan polimer sintetik dari monomer vinil alkohol digunakan sebagai material dasar pembuatan hidrogel yang bersifat hidrofilik karena memiliki gugus OH dan dapat berikatan hidrogen dengan air sehingga mampu mempermudah proses pembentukan gel [9]. Tetapi hidrogel dengan bahan dasar PVA memiliki sifat mekanik yang mudah rapuh, sehingga perlu dimodifikasi untuk menaikkan sifat mekaniknya [10]. Modifikasi yang dapat dilakukan oleh hidrogel PVA yaitu dengan penambahan agen pengikat silang (*crosslinker*), modifikasi tersebut dapat meningkatkan sifat mekanik,

kinerja, dan stabilitas air [11]. Glutaraldehid (GA) merupakan pengikat silang yang paling umum digunakan untuk PVA. Hidrogel PVA dapat diperoleh dengan memanfaatkan ikatan silang kovalen antara PVA dan glutaraldehid dimana gugus hidroksil PVA bereaksi dengan gugus aldehid membentuk jembatan asetal dengan asam sebagai katalis [12].

Penggunaan hidrogel polimer sintetik masih memiliki beberapa kekhawatiran yaitu sulit untuk didegradasi dan masalah pembuangan limbah. Dalam penelitian ini digunakan daun cincau hijau (*Premna oblongifolia* Merr.) sebagai salah satu material hidrogel. Kandungan dalam cincau hijau yang dimanfaatkan sebagai pembentuk gel yaitu polisakarida pektin. Pektin bersifat biodegradabilitas, biokompatibilitas, memiliki kemampuan gelasi dan permeabilitas gas yang baik [13].

Hidrogel dengan menggunakan material polimer alam memiliki beberapa kelebihan diantaranya ringan, biaya rendah, biodegradable, toksisitas rendah, tahan korosif, mudah diproduksi dan sangat kompatibel [14], tetapi polimer tidak memiliki sifat mekanik, listrik dan termal yang tinggi [15]. Masalah ini dapat diatasi dengan menambahkan nano-filler ke dalam matriks polimer seperti *carbon nanotube* (CNT). Penambahan CNT menghasilkan komposit dengan adanya peningkatan kekuatan mekanik dan sifat transpor elektron. Kombinasi PVA dengan CNT tidak membentuk ikatan kimia, tetapi dapat menghasilkan serat komposit yang lebih keras daripada serat organik lain yang dikenal [16]. Baik CNT berdingg tunggal dan berdingg banyak (SWCNT dan MWNT) dapat digunakan dalam bentuk larutan dispersinya [17].

Nutrien atau unsur hara yang dibutuhkan tanaman terbagi menjadi 2 kelompok, yaitu makronutrien dan mikronutrien. Kalsium (Ca) sebagai makronutrien sekunder dan mikronutrien seng (Zn) diperlukan untuk kehidupan tanaman. Kalsium berperan sebagai penyusun komponen struktural dinding dan membran sel yang membawa pesan intraseluler dan diperlukan untuk pembentukan sel baru [18]. Kekurangan kalsium mempengaruhi penampilan daun, perubahan bentuk daun, dan ujung daun berwarna

coklat atau hitam [19]. Seng atau zink (Zn) merupakan salah satu mikronutrien yang dibutuhkan tumbuhan untuk berperan dalam proses pengembangan dan fungsi kloroplas, yang berhubungan dengan proses fotosintesis [20]. Tanaman yang kekurangan Zn menunjukkan bahwa pertumbuhan buah menjadi terhambat, klorosis daun, ruas dan tangkai daun memendek, dan daun-daun kecil yang rusak akan berkumpul di bagian atas tanaman [21].

Mekanisme pelepasan pupuk lepas terkontrol berbasis gel (CRF) melibatkan kontrol difusi yang didasarkan pada asumsi bahwa pelepasan nutrisi dari CRF yang dilapisi dikendalikan oleh difusi zat terlarut dari pupuk dengan mengabaikan penyerapan air oleh pupuk [22]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengamati perilaku ion (dalam hal ini Ca^{2+} dan Zn^{2+} sebagai ion bivalen) yang mampu keluar dari hidrogel dengan mempertimbangkan beberapa karakteristik dan kinerja dari hidrogel yang digunakan.

METODE

Alat

Pada penelitian ini alat yang digunakan yaitu neraca analitik, *hotplate*, termometer, *overhead stirrer*, labu ukur 50, 100, dan 500 mL, gelas ukur 10, 50 mL, 100 dan 250 mL, gelas kimia 100, 400 dan 500 mL, pipet volumetri 5, 10, 25 dan 50 mL, cetakan hidrogel 10 cm x 10 cm, pipet tetes, batang pengaduk, spatula, kaca arloji, konduktometer, pH meter, mikrometer (Mutitoyo 0-25 mm 0,0001 mm), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) (Shimadzu 8400), dan *Scanning Electron Spectroscopy* (SEM) (TESCAN Vega 4).

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu polivinil alkohol (PVA) p.a (BM: 145000 g/mol) *fully hydrolized* (Merck), glutaraldehid (GA) 25% (Merck), daun cincau hijau (lokal) (*Premna oblongifolia* Merr.), *Multiwalled Carbon Nanotube* (MWCNT) *functionalized*, *graphene oxide* (GO), metanol (CH_3OH) 96% p.a (Merck), asam asetat (CH_3COOH) glasial (Merck), asam sulfat (H_2SO_4) 97% p.a (Merck), kalsium klorida p.a ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Merck), dan zink (II) klorida p.a (ZnCl_2) (Merck).

Prosedur

Prosedur pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahap yaitu tahap preparasi bahan prekursor, optimasi komposisi prekursor, sintesis hidrogel, karakterisasi dan analisis kinerja hidrogel. Metode ini merujuk pada metode penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh [23] dengan modifikasi.

Sintesis dan Pencucian Hidrogel

Larutan *crosslinker* dibuat dengan mencampurkan dibuat dengan mencampurkan larutan metanol 10%, asam asetat 10%, asam sulfat 10%, dan glutaraldehid 1,25% dengan

perbandingan 3:2:1:1, kemudian dihomogenkan. Larutan POM 1% dibuat dengan melakukan ekstraksi 1 gram bubuk POM kering menggunakan NaOH pH 8-10 sebanyak 100 mL. Larutan dispersi MWCNT dibuat dengan mendispersikan padatan MWCNT yang telah difungsionalisasi sebanyak sebanyak 1 mg kedalam larutan 1% (1% dalam 100 mL akuades) *graphene oxide* (GO) 100 mL kemudian dilakukan ultrasonikasi selama 3 jam.

Hidrogel disintesis menggunakan metode kopolimerisasi larutan yang dilakukan dengan cara mencampurkan larutan PVA, *crosslinker* GA, ekstrak POM 1%, dan larutan dispersi MWCNT dengan perbandingan volume yang ditunjukkan pada Tabel 1. yang merupakan perbandingan volume setiap prekursor yang digunakan.

Tabel 1. Variasi setiap prekursor pada proses optimasi komposisi optimum

KONSENTRASI PVA (%)	KOMPOSISI (mL)			
	PVA	<i>Crosslinker</i>	POM 1%	Dispersi <i>functionalized</i> MWCNT
1	10	18	-	-
2	10	18	-	-
	10	18	-	-
	10	10	10	-
3	10	5	10	-
	15	7.5	15	-
	15	7.5	15	7

Setelah didapatkan komposisi optimum, hidrogel PGP disintesis dengan mencampurkan larutan PVA, *crosslinker* dan ekstrak POM, sedangkan Hidrogel PGPC disintesis dengan mencampurkan larutan PVA, *crosslinker*, ekstrak POM, dan dispersi *functionalized* MWCNT. Semua prekursor hidrogel tersebut kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* sambil dipanaskan pada suhu 50°C selama 7 menit. Larutan yang telah homogen dituangkan ke dalam cetakan berbahan akrilik berukuran 10x10 cm dan dikeringkan pada udara terbuka selama ± 5 hari.

Hidrogel yang telah kering dilakukan pencucian dengan menggunakan 400 mL akuades yang telah diukur pH dan konduktivitas awal. Akuades diaduk menggunakan *overhead stirrer* dengan kecepatan 200 rpm. Pencucian hidrogel dilakukan secara berulang atau hingga konduktivitas larutan konstan dan pH larutan mendekati pH awal akuades. Setelah selesai pencucian, hidrogel dikeringkan kembali di udara terbuka selama 24 jam.

Karakterisasi Hidrogel

Sampel yang digunakan untuk karakterisasi hidrogel merupakan sampel hidrogel PGP dan PGPC yang telah dicuci dan dikeringkan kembali. Gugus fungsi yang terbentuk dalam hidrogel di karakterisasi menggunakan

spektroskopi FTIR (Shimadzu 4800) dengan membentuk plat dengan KBr. Spektrum FTIR dihasilkan dari scanning bilangan gelombang 1000-4000 cm^{-1} . Morfologi dan penampang melintang hidrogel dianalisis dari hasil karakterisasi menggunakan SEM.

Sifat hidrofilitas dapat ditentukan dengan mengukur sudut kontak air (*Water Contact Angle*) dengan meneteskan akuades (20 μL) diatas permukaan hidrogel kering berukuran 1x1 cm. Pengukuran sudut kontak dilakukan sebanyak 5x untuk setiap hidrogel dan perhitungan nilai sudut kontak dilakukan melalui *Software Java ImageJ* fitur *dropsnake*.

Porositas hidrogel dihitung dengan menggunakan metode *Dry Wet Zett* dan dinyatakan dalam persen. Hidrogel berukuran 1x1 cm ditimbang sebagai massa hidrogel kering kemudian direndam dalam wadah berisi 50 mL akuades selama 24 jam. Setelah 24 jam, hidrogel ditimbang sebagai massa hidrogel basah [24]. Persen porositas dapat diukur menggunakan persamaan:

$$P = \frac{\frac{w_w - w_d}{\rho_w} + \frac{w_d}{\rho_p}}{\frac{w_w - w_d}{\rho_w} + \frac{w_d}{\rho_p}} \times 100$$

dimana w_w dan w_d adalah massa hidrogel basah dan kering (gram), ρ_w adalah densitas air (g/cm^3) yang didapat dari referensi literatur dan telah disesuaikan dengan kondisi pengukuran, ρ_p adalah densitas polimer (g/cm^3) yang didapat dari perhitungan massa jenis hidrogel yaitu massa kering hidrogel per volume hidrogel yang digunakan.

Uji Kinerja Hidrogel

Sampel yang digunakan untuk uji kinerja adalah sampel hidrogel PGP dan PGPC berukuran 2x2 cm yang telah dicuci dan dikeringkan kembali. Kemampuan hidrogel untuk mengabsorb air dapat ditentukan dari pengukuran nilai persentase *swelling ratio* (%SR) yang dilakukan dengan cara menimbang hidrogel kering kemudian direndam dalam 50 mL akuades dan ditimbang setiap lima menit sebagai massa hidrogel basah, pengukuran dilakukan hingga massa hidrogel konstan atau hingga tidak terjadi perubahan dan kerusakan pada hidrogel. Besarnya air yang terabsorb oleh hidrogel ditunjukkan sebagai % *swelling ratio* yang dihitung dengan cara:

$$SR(\%) = \frac{(W_s - W_d)}{W_d} \times 100$$

dimana W_s dan W_d adalah massa hidrogel basah dan kering (gram)

Kemampuan hidrogel dalam mempertahankan air pada waktu tertentu dapat ditentukan dari pengukuran nilai persentase *water retention* (%WR) yang dilakukan dengan cara menimbang hidrogel hasil pengukuran SR sebagai massa hidrogel basah, kemudian hidrogel disimpan di

dalam wadah dan dikeringkan di dalam desikator. Dilakukan penimbangan massa hidrogel setiap satu jam hingga mendapatkan massa yang konstan. Nilai %WR dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$WR(\%) = \frac{(W_t - W_\infty)}{(W_0 - W_\infty)} \times 100\%$$

dimana W_0 adalah massa hidrogel awal (massa hidrogel basah hasil *swelling*) W_t adalah massa hidrogel kering yang diukur setiap hari, dan W_∞ adalah massa akhir hidrogel konstan.

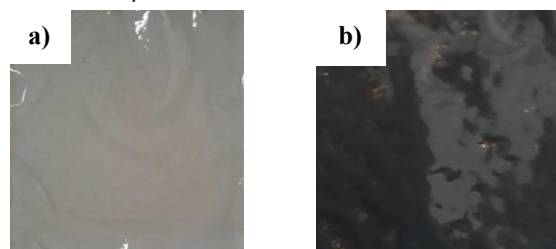
Kemampuan hidrogel untuk mengabsorpsi nutrisi dan desorpsi nutrisi dilakukan dengan menggunakan metode konduktometri. Proses absorpsi nutrisi dilakukan dengan merendam hidrogel berbeda pada 400 mL nutrisi berbeda yaitu larutan CaCl_2 dan ZnCl_2 dengan konsentrasi masing-masing 0,125 dan 0,25M. Konduktivitas larutan diukur setiap 30 detik menggunakan konduktometer disertai pengadukan menggunakan *overhead stirrer* kecepatan 200 rpm hingga konduktivitas larutan konstan. Setelah proses absorpsi selesai, hidrogel dikeringkan di udara terbuka selama 24 jam.

Kemampuan desorpsi nutrisi dari hidrogel dilakukan dengan merendam masing-masing hidrogel hasil absorpsi di dalam 400 mL akuades berbeda. Konduktivitas akuades diukur setiap 30 detik dengan adanya pengadukan menggunakan *overhead stirrer* dengan kecepatan 200 rpm hingga konduktivitas larutan konstan. Setelah proses desorpsi selesai, hidrogel dikeringkan di udara terbuka selama 24 jam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Sintesis dan Pencucian Hidrogel

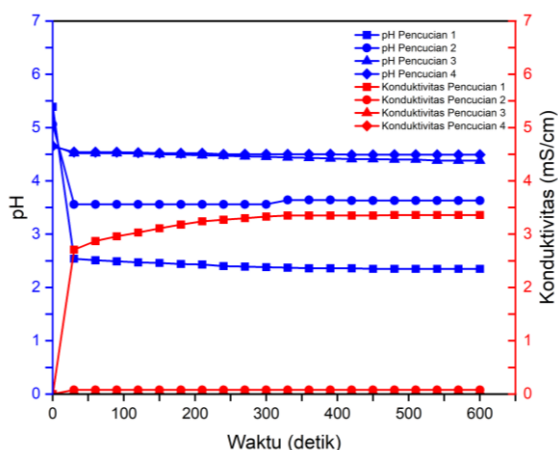
Proses optimasi perbandingan komposisi optimum setiap prekursor dilakukan dengan mengamati sifat fisik hidrogel yang didapatkan. Hidrogel dengan perbandingan komposisi optimum ditunjukkan dari visual hidrogel yang tidak membentuk gumpalan pada permukaan hidrogel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Perbandingan komposisi optimum yang didapatkan yaitu menggunakan prekursor PVA 3% sebanyak 15, crosslinker GA sebanyak 7,5 mL, ekstrak POM 1% sebanyak 15 mL dan disperse MWCNT sebanyak 7 mL.



Gambar 1. Hidrogel (a) PVA/GA/POM (PGP) dan (b) PVA/GA/POM/CNT (PGPC)

Setelah dikeringkan ± 5 hari Hidrogel PGP yang didapatkan yaitu hidrogel berwarna kuning dan transparan, sedangkan hidrogel PGPC yang didapatkan yaitu berwarna hitam. Hidrogel kering kemudian dilakukan pencucian karena pada sintesis hidrogel menggunakan *crosslinker* yang terdiri dari metanol, asam asetat, asam sulfat dan glutaraldehid, penggunaan asam tersebut berfungsi sebagai pembawa suasana asam dan sebagai katalis karena reaksi *crosslinking* berlangsung pada suasana asam, tetapi pada proses sintesis terdapat asam yang tidak bereaksi sehingga harus dihilangkan karena akan mempengaruhi sifat fisiko-kimia hidrogel yaitu dapat terlibat sebagai nilai konduktivitas larutan, selain itu apabila diaplikasikan pada tanah akan mempengaruhi pH tanah menjadi asam yang mengakibatkan penurunan ketersediaan unsur hara pada tanah. Teknik pencucian yang efektif yaitu dengan menggunakan volume larutan pencuci yang sedikit tetapi dengan pengulangan yang banyak sehingga bahan sisa akan lebih banyak yang keluar, karena apabila dilakukan pencucian langsung dengan volume besar dan pengulangan yang sedikit, dikhawatirkan masih ada materi sisa yang masih ada di dalam hidrogel dan belum keluar sempurna.

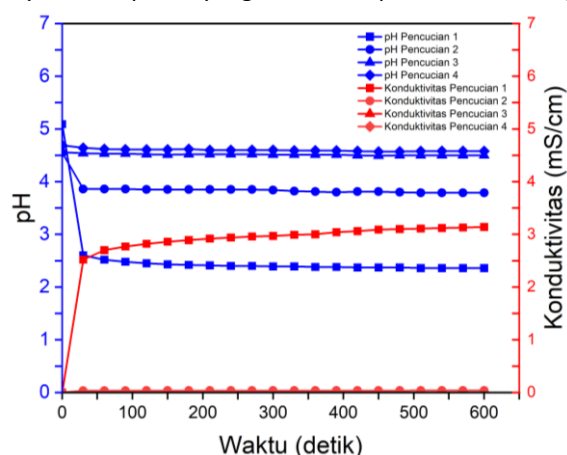
Gambar 2 dan 3 menunjukkan hasil pencucian hidrogel PGP dan PGPC, dari kedua hidrogel tersebut memiliki tren pH dan konduktivitas yang mirip. pH menunjukkan banyaknya ion H^+ yang terdapat pada larutan, dalam hal ini pH menunjukkan banyaknya ion H^+ sisa asam yang keluar dari hidrogel, sisa asam tersebut dapat berada pada permukaan hidrogel maupun di dalam hidrogel. Selain pH, konduktivitas juga menunjukkan sifat dari larutan yaitu menunjukkan adanya ion dalam larutan selain ion H^+ .



Gambar 2. Grafik hubungan waktu dengan pH dan konduktivitas larutan hasil pencucian hidrogel PGP

Akuades memiliki pH awal sekitar 5, pada pencucian pertama baik pada hidrogel PGP maupun PGPC mengalami penurunan pH yang drastis menjadi pH sekitar 2,5 dalam waktu yang singkat, hal tersebut menunjukkan bahwa banyak sisa asam yang keluar dari permukaan hidrogel. Pada pencucian pertama tren konduktivitas baik untuk

hidrogel PGP dan PGPC mengalami kenaikan secara drastis pada waktu yang singkat, hal tersebut menunjukkan adanya beberapa ion yang keluar dari permukaan hidrogel.



Gambar 3. Grafik hubungan waktu dengan pH dan konduktivitas larutan hasil pencucian hidrogel PGPC

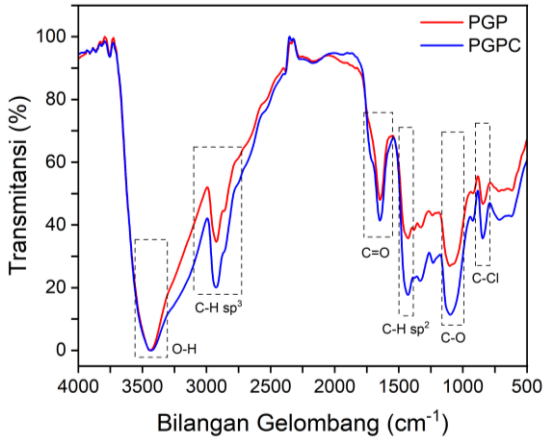
Sisa asam dan ion lain dalam hidrogel membutuhkan waktu lama untuk melakukan proses difusi keluar hidrogel. Oleh karena itu dilakukan pencucian selanjutnya untuk memastikan sisa asam telah keluar secara keseluruhan baik dari permukaan maupun dari dalam hidrogel. Hasil dari pencucian kedua mengalami penurunan pH dan kenaikan konduktivitas yang tidak terlalu besar dibandingkan sebelumnya, hal tersebut menunjukkan bahwa sisa asam dan ion telah berkurang dari sebelumnya. Pada pencucian ketiga menunjukkan pH dan konduktivitas larutan yang mendekati pH awal larutan, hal tersebut menunjukkan bahwa hampir seluruh sisa asam dan ion lain telah keluar dari hidrogel, tetapi untuk lebih meyakinkan bahwa sudah tidak ada residu lain maka dilakukan pencucian keempat. Pencucian keempat menunjukkan tren yang sama dengan pencucian ketiga yaitu pH larutan hampir sama dengan pH akuades awal, maka proses pencucian bisa dihentikan. Setelah pencucian selesai, hidrogel dikeringkan di udara terbuka selama 24 jam.

Hasil Karakterisasi Hidrogel

Interaksi pada Hidrogel

Interaksi yang terbentuk dari setiap prekursor dalam hidrogel dapat dianalisis dari spektra FTIR (ditunjukkan pada Gambar 4.). Bilangan gelombang sekitar 3433 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi ulur O-H dari ikatan hidrogen antar molekul dan intra molekul PVA [25]. Bilangan gelombang 2922 dan 2924 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi ulur asimetris C-H, sedangkan bilangan gelombang 1427 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi tekuk simetris C-H dari gugus alkil. Selain itu, munculnya vibrasi pada bilangan gelombang 1647 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur C=O yang berasal dari terbentuknya ikatan hidrogen baru dari gugus CHO pada kedua ujung GA yang hampir sepenuhnya digunakan untuk bereaksi dengan gugus O-H pada PVA [26]. Bilangan gelombang 1103 dan 1099 cm^{-1}

menunjukkan pita tajam vibrasi ulur C-O yang berasal dari adanya ikatan eter (C-O-) atau asetal (C-O-C) hasil dari pembentukan ikatan silang PVA dengan GA [27]. Bilangan gelombang 845 cm^{-1} menunjukkan vibrasi gugus C-Cl berasal dari senyawa yang terkandung di dalam POM, karena POM merupakan senyawa bahan alam metabolit sekunder

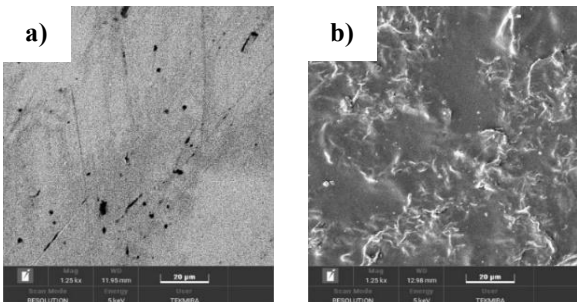


Gambar 4. Spektra FTIR hidrogel PGP dan PGPC

Berdasarkan analisis spektra FTIR, menunjukkan bahwa penambahan *functionalized* CNT tidak menyebabkan adanya penambahan puncak, tetapi terdapat perbedaan intensitas serapan dan pergeseran bilangan gelombang yang tidak signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa tidak adanya interaksi kimia antara *functionalized* CNT dengan prekursor lain, melainkan hanya terjadi interaksi secara fisika yang hanya memperkuat sifat mekanik hidrogel. Adanya peningkatan serapan pada 2924, dan 1427 cm^{-1} menunjukkan puncak serapan C-H yang terjadi karena interaksi yang kuat antara gugus fungsi C-H. Selain itu peningkatan serapan pada 1647 dan 1099 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus C=O dan C-O yang berasal dari fungsionalisasi CNT [28].

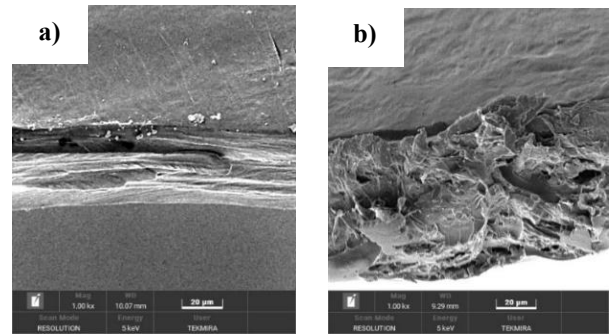
Morfologi Hidrogel

Morfologi permukaan hidrogel PGP dan PGPC hasil sintesis dapat diamati dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada perbesaran 1250x yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Morfologi permukaan hidrogel (a) PGP dan (b) PGPC

Gambar 5 menunjukkan bahwa permukaan hidrogel PGP lebih halus dibandingkan hidrogel PGPC. Apabila dilihat pada Gambar 5 (b), Penambahan CNT pada hidrogel menyebabkan terbentuknya permukaan yang kasar karena terdapat tonjolan pada permukaan hidrogel, sehingga hidrogel memiliki area lebih luas. Semua fenomena tersebut dapat menunjukkan bahwa terdapat peningkatan antarmuka antara *functionalized* CNT dengan hidrogel [29]. Selain morfologi permukaan, hidrogel juga dilihat dari morfologi melintang yang terlihat pada perbesaran 1000x ditunjukkan pada Gambar 6.

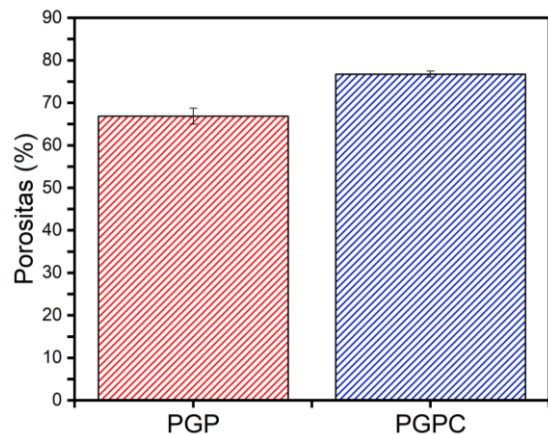


Gambar 6. Morfologi penampang melintang hidrogel (a) PGP dan (b) PGPC

Gambar 6 (a) menunjukkan bahwa morfologi melintang dari hidrogel PGP memiliki pori yang lebih teratur sedangkan Gambar 6 (b) menunjukkan bahwa morfologi melintang hidrogel PGPC memiliki pori yang asimetris serta distribusinya tidak merata. Hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan *functionalized* CNT kedalam hidrogel membuat hidrogel menjadi lebih *porous*.

Porositas Hidrogel

Porositas hidrogel berpengaruh terhadap kemampuan hidrogel untuk melakukan absorpsi maupun desorpsi cairan. Porositas hidrogel PGP dan PGPC ditunjukkan pada Gambar 7.

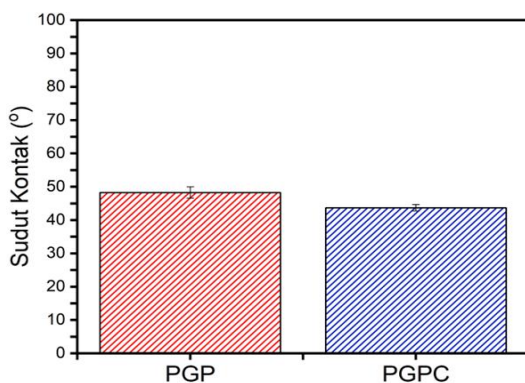


Gambar 7. Hasil pengukuran porositas hidrogel PGP dan PGPC

Berdasarkan Gambar 7 terlihat bahwa hidrogel PGP memiliki nilai porositas yang lebih kecil (66,85%) dibandingkan hidrogel PGPC (76,71%). Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan penambahan *functionalized* CNT akan meningkatkan nilai porositas yang berhubungan dengan peningkatan ukuran pori. CNT yang telah difungsionalisasi memiliki gugus hidrofilik yang banyak dapat meningkatkan porositas melalui ikatan pori saling terhubung menyebabkan ukuran lubang yang lebih besar sehingga menyediakan jalur selektif sebagai lintasan untuk absorpsi cairan [30].

Sifat Hidrofilisitas Hidrogel

Sifat hidrofilisitas hidrogel merupakan salah satu karakter yang penting untuk hidrogel karena berhubungan langsung dengan kemampuan hidrogel untuk menampung cairan pada struktur tiga dimensinya. Tetesan air pada permukaan hidrofobik akan mengalir dengan sangat mudah dan akan mempertahankan bentuknya yang bulat sehingga akan menghasilkan sudut kontak lebih dari 90° dan sulit untuk dibasahi. Sebaliknya, untuk permukaan hidrofilik, tetesan air menyebar jauh, dan sudut kontak sangat kecil dengan kurang dari 90° [31]. Gambar 8 menunjukkan hasil pengukuran sudut kontak untuk setiap hidrogel yang digunakan.



Gambar 8. Hasil pengukuran sudut kontak air hidrogel PGP dan PGPC

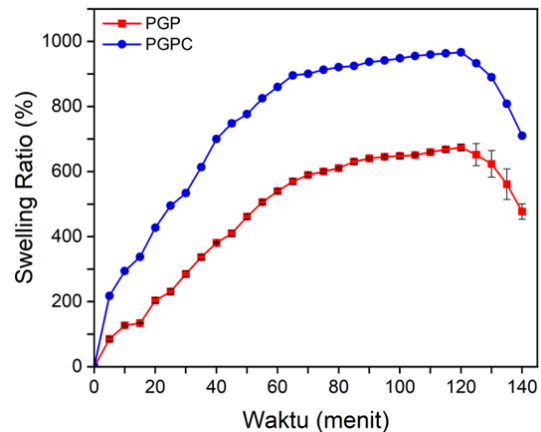
Gambar 8 menunjukkan bahwa kedua hidrogel termasuk kedalam hidrogel hidrofilik karena memiliki sudut kontak <90°. Hidrogel PGP memiliki sudut kontak 48,27° dan PGPC memiliki sudut kontak 43,68°. Penambahan *functionalized* CNT kedalam hidrogel menyebabkan penurunan nilai sudut kontak, sehingga hidrogel PGPC bersifat lebih hidrofilik dibandingkan hidrogel PGP. Sifat hidrofilisitas hidrogel PGPC meningkat karena adanya adanya gugus karboksil, hidroksil dan amida yang bersifat polar pada CNT hasil fungsionalisasi sehingga dapat menarik molekul air [32].

Hasil Uji Kinerja Hidrogel

Swelling Ratio

Pengujian *swelling ratio* sangat berpengaruh pada kinerja hidrogel apabila diaplikasikan pada pupuk. Tahap awal pada

mekanisme CRF yaitu air tanah akan membasahi retakan yang ada pada lapisan pupuk dan menembus ke inti, dimana sebagian kecil pupuk dilarutkan, pada tahap tersebut hidrogel mengalami *swelling*. Menurut [33], laju absorpsi dipengaruhi oleh jumlah hidrofilik yang terdapat dalam hidrogel, tetapi kemampuan akomodasi dipengaruhi oleh luas permukaan pori dan kekuatan mekanik pori hidrogel untuk menyerap air yang terabsorpsi. Hasil pengukuran *swelling ratio* untuk hidrogel PGP dan PGPC ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Hasil pengukuran swelling ratio hidrogel PGP dan PGPC

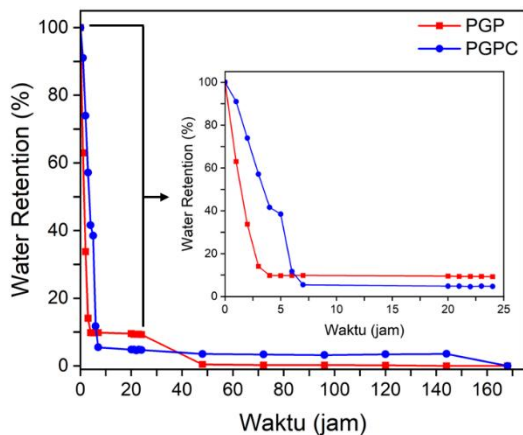
Dari Gambar 9 terlihat bahwa pada waktu 120 menit, hidrogel PGPC memiliki *swelling ratio* yang lebih besar yaitu 966,4% dibandingkan hidrogel PGP yaitu 673,9%. Peningkatan nilai swelling ratio tersebut didukung oleh hasil karakterisasi sifat hidrofilisitas dan pengukuran porositas, dimana hidrogel PGPC memiliki karakter permukaan yang lebih hidrofilik serta ukuran pori yang lebih besar dibandingkan hidrogel PGP, sehingga air mampu terserap kedalam hidrogel PGPC lebih banyak dibandingkan hidrogel PGP. Pada [34] juga menunjukkan bahwa penambahan CNT dapat mengurangi *density crosslink*. Setelah lebih dari 120 menit, swelling ratio untuk kedua hidrogel mengalami penurunan yang tajam, hal tersebut diduga telah terjadi abrasi di dalam struktur hidrogel yang disebabkan karena adanya bahan prekursor yang keluar hidrogel sehingga larut dengan air dan menurunkan massa hidrogel.

Water Retention

Pengukuran *water retention* didasarkan pada penguapan air yang hilang dari hidrogel. Gambar 10 menunjukkan hasil pengukuran *water retention* hidrogel PGP dan PGPC.

Dari Gambar 10 terlihat bahwa seiring bertambahnya waktu, %WR untuk kedua hidrogel akan semakin menurun. Pada 0 hingga 6 jam, hidrogel PGPC memiliki %WR yang lebih tinggi dibandingkan hidrogel PGP, hal tersebut karena hidrogel PGPC memiliki porositas yang lebih besar sehingga air lebih mudah keluar dari hidrogel. Pada 7 hingga 144 jam, tren hidrogel PGPC sudah cukup stabil dan

tidak terjadi perubahan yang signifikan, hal tersebut didukung dari sifat fisik permukaan hidrogel PGPC yang lebih cepat kering dibandingkan hidrogel PGP, tetapi massa penimbangan lebih besar dibandingkan hidrogel PGP, hal tersebut menunjukkan terdapat air yang terikat kuat di dalam hidrogel.



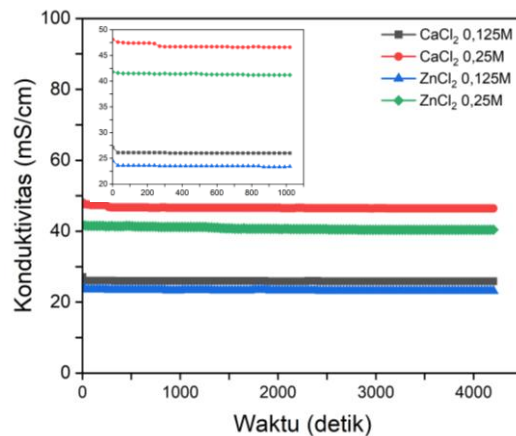
Gambar 10. Hasil pengukuran *water retention* hidrogel PGP dan PGPC

Fenomena tersebut dapat dihubungkan dari ikatan yang terjadi dalam hidrogel. Hidrogel PGPC memiliki gugus hidrofilik yang lebih banyak sehingga mampu membentuk interaksi dengan air lebih kuat dan akan mempertahankan air lebih kuat dalam struktur hidrogelnya, hal tersebut berbeda dengan hidrogel PGP yang memiliki gugus hidrofilik lebih sedikit. Menurut [35], hidrogel yang memiliki gugus hidrofilik lebih sedikit akan lebih mudah mengalami penurunan *deswelling*, karena interaksi di dalam hidrogel dengan molekul air menjadi lebih lemah.

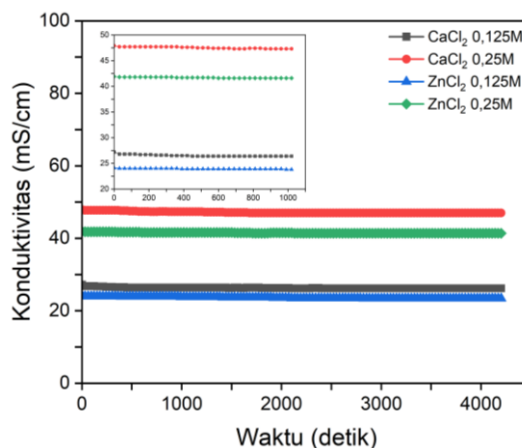
Absorpsi (Impregnasi) Nutrien dan Desorpsi (Release) Nutrien

Konduktivitas suatu larutan adalah kemampuan larutan untuk menghantarkan arus listrik, arus listrik larutan berasal dari ion yang terkandung dalam larutan, oleh karena itu nilai konduktivitas dipengaruhi dari konsentrasi ion total dalam larutan. Konduktansi dan difusi dapat menunjukkan gerak ion [36]. Hasil dari pengukuran konduktivitas pada proses absorpsi (impregnasi) ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12 yang memberikan informasi bahwa baik pada hidrogel PGP dan PGPC, semakin tinggi konsentrasi akan memiliki nilai konduktivitas yang lebih besar karena kandungan ion dalam larutan lebih banyak dibandingkan konsentrasi yang lebih kecil. Sedangkan pada konsentrasi larutan yang sama, pada hidrogel PGP dan PGPC larutan CaCl_2 memiliki nilai konduktivitas yang lebih besar dibandingkan dengan ZnCl_2 . Larutan yang masuk ke dalam hidrogel adalah ion dalam bentuk terhidrasi. Kemampuan absorpsi ini dapat dipengaruhi dari *hydrodynamic radii* dari masing-masing ion karena menggambarkan ukuran ion dalam larutan dan interaksinya dengan pelarut. Ca^{2+} memiliki *hydrodynamic radii* $1,548 \times 10^{-10}$ mm sedangkan Zn^{2+} $1,745 \times 10^{-10}$ mm. Hidrasi ion bergantung pada interaksi elektrostatis molekul

air dengan ion. Dalam proses ini, molekul air mengikat ion melalui ikatan ion-dipol yang sebagian besar bersifat elektrostatis. Kekuatan ikatan hidrogen dalam molekul air dapat bervariasi dengan ion yang berbeda. Kerapatan muatan ion sangat berpengaruh pada interaksi ini, sehingga ion dengan ukuran kecil menarik lebih banyak molekul air [37] dan akan menunjukkan nilai konduktivitas yang besar.



Gambar 11. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses absorpsi nutrien pada hidrogel PGP

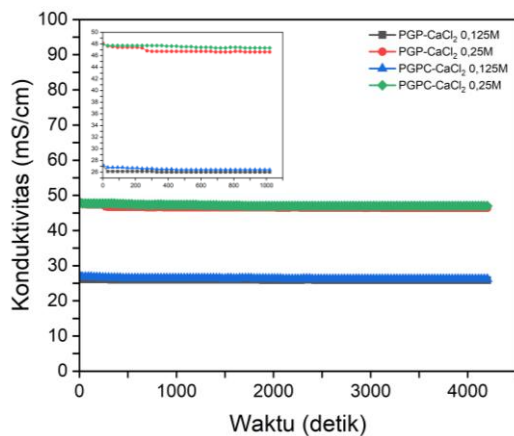


Gambar 12. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses absorpsi nutrien pada hidrogel PGPC

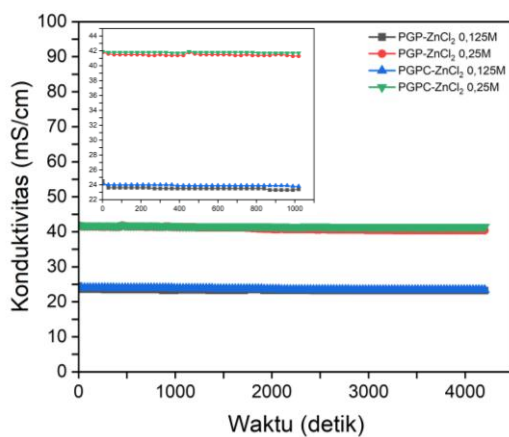
Kemampuan absorpsi juga ditinjau dari karakteristik hidrogel PGP dan PGPC yang digunakan. Tren kemampuan hidrogel mengabsorb nutrien ditunjukkan pada Gambar 13 dan 14 yang menggambarkan bahwa konduktivitas larutan CaCl_2 maupun ZnCl_2 lebih besar pada hidrogel PGPC dibandingkan hidrogel PGP.

Hasil absorpsi tersebut berbanding terbalik dengan hasil pengukuran *swelling ratio* setiap hidrogel. Dari hasil *swelling ratio*, terlihat bahwa hidrogel PGPC memiliki kemampuan mengabsorb air lebih besar dibandingkan hidrogel PGP (ditunjukkan pada Gambar 9), tetapi pada absorpsi nutrien hidrogel PGPC mengabsorb nutrien lebih sedikit dibandingkan hidrogel PGP. Hal tersebut dapat terjadi karena kemungkinan nutrien yang digunakan (baik CaCl_2 maupun ZnCl_2) dapat mengurangi polaritas air yang

digunakan sehingga jumlah nutrisi yang mampu terabsorb dalam hidrogel menjadi lebih sedikit.



Gambar 13. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses absorpsi pada hidrogel PGP dan PGPC untuk nutrisi CaCl_2

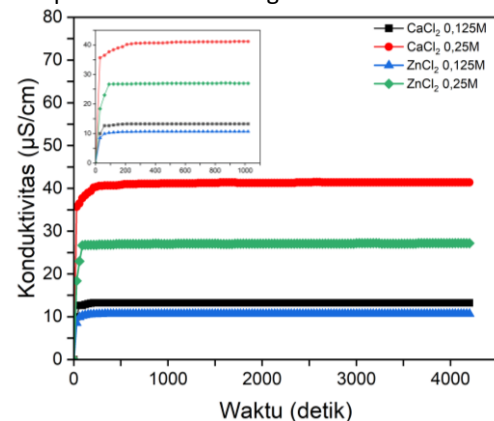


Gambar 14. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses absorpsi pada hidrogel PGP dan PGPC untuk nutrisi ZnCl_2

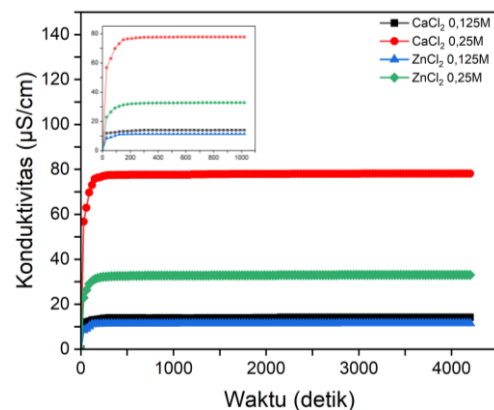
Kinerja hidrogel juga dapat dilihat dari kemampuan nutrisi untuk *release* keluar hidrogel yang dapat dilihat dari kemampuan ion untuk berdifusi. Gambar 15 dan 16 menunjukkan hasil desorpsi nutrisi CaCl_2 dan ZnCl_2 baik pada hidrogel PGP dan PGPC.

Terlihat bahwa dari 90 detik pertama terjadi kenaikan konduktivitas yang cepat, proses tersebut disebut juga proses lag atau proses pembasahan hidrogel oleh akuades dan proses akuades masuk kedalam pori-pori hidrogel, pada proses tersebut juga hidrogel mengalami *swelling*. Kemudian setelah akuades masuk, akuades akan melarutkan nutrisi dan nutrisi akan keluar sesuai dengan kemampuan difusinya. Larutan nutrisi dengan konsentrasi lebih tinggi memiliki kemampuan untuk keluar hidrogel lebih cepat dibandingkan dengan larutan dengan konsentrasi lebih kecil. Hal tersebut dapat dipengaruhi dari banyaknya ion yang terabsorb dalam hidrogel sehingga mendorong untuk berdifusi lebih cepat. Sedangkan pada

konsentrasi yang sama, pada kedua hidrogel ion Ca^{2+} memiliki kemampuan berdifusi keluar hidrogel lebih cepat dibandingkan Zn^{2+} . Hal tersebut dibuktikan dari nilai koefisien difusi (D) dari ion Ca^{2+} lebih besar ($1,548 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) dibandingkan ion Zn^{2+} ($1,405 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$). Nilai koefisien tersebut mendorong ion untuk keluar dari media dengan konsentrasi tinggi (hidrogel) ke media dengan konsentrasi lebih kecil (akuades). Pada fase akhir menunjukkan pori hidrogel telah terisi penuh oleh nutrisi sehingga nilai konduktivitas menjadi konstan. Nilai konduktivitas tersebut menunjukkan banyaknya nutrisi yang mampu keluar dari hidrogel.



Gambar 15. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses desorpsi nutrisi pada hidrogel PGP

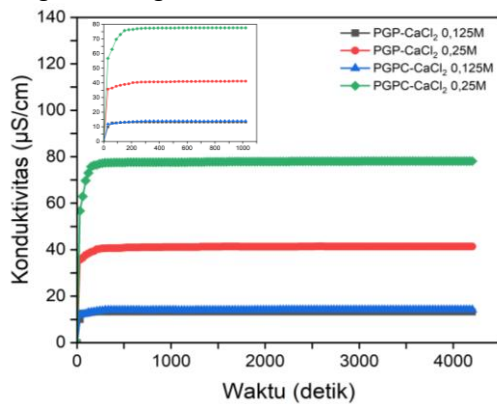


Gambar 16. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses desorpsi nutrisi pada hidrogel PGPC

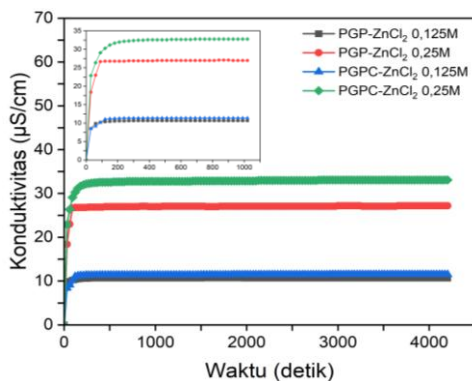
Kemampuan desorpsi nutrisi juga dipengaruhi oleh sifat hidrogel yang digunakan. Gambar 20 dan 21 menunjukkan hasil pengukuran konduktivitas pada proses desorpsi untuk setiap nutrisi pada hidrogel yang berbeda.

Dari Gambar 20 dan 21 terlihat bahwa nutrisi lebih cepat keluar dari hidrogel PGPC dibandingkan PGP, dalam kata lain hidrogel PGP lebih mengabsorb nutrisi lebih kuat dibandingkan hidrogel PGPC sehingga nutrisi pada hidrogel PGP mengalami desorpsi lebih lambat. Hal tersebut juga didukung dari data porositas hidrogel (ditunjukkan pada Gambar 7), hidrogel PGPC memiliki porositas yang lebih besar sehingga nutrisi akan lebih cepat keluar dari hidrogel dibandingkan pada hidrogel PGP.

Selain itu dapat juga didukung dari data hidrofilitas hidrogel (ditunjukkan pada Gambar 8), hidrogel PGPC memiliki sifat hidrofilitas yang lebih besar sehingga air sebagai media pada pengujian desorpsi lebih mudah berinteraksi dengan nutrisi yang keluar dari hidrogel PGPC dibandingkan hidrogel PGP.



Gambar 20. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses desorpsi nutrisi pada hidrogel PGP dan PGPC untuk nutrisi CaCl_2



Gambar 21. Grafik konduktivitas sebagai fungsi waktu proses desorpsi nutrisi pada hidrogel PGP dan PGPC untuk nutrisi ZnCl_2

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa hidrogel PVA/GA/POM/CNT berhasil disintesis dengan rasio volume optimum 15:7,5:15:7 mL. Penambahan *functionalized* CNT ke dalam campuran prekursor PVA, GA, dan POM tidak terjadi interaksi kimia, morfologi hidrogel menjadi lebih kasar dan berpori, meningkatkan porositas dan sifat hidrofilitas. Selain itu meningkatkan kemampuan hidrogel untuk menyerap dan mempertahankan air dalam struktur hidrogel, tetapi mengurangi kemampuan absorpsi dan mempercepat desorpsi nutrisi CaCl_2 dan ZnCl_2 . Pada konsentrasi yang sama, nutrisi CaCl_2 lebih mudah mengalami desorpsi (*release*) pada kedua hidrogel dibandingkan nutrisi ZnCl_2 .

DAFTAR PUSTAKA

[1] P. Songkhum, T. Wuttikhun, N. Chanlek, P. Khemthong, and K. Laohasurayotin, "Controlled release

studies of boron and zinc from layered double hydroxides as the micronutrient hosts for agricultural application," *Applied Clay Science*, vol. 152, Feb., pp. 311–322, 2018

[2] X. Liu, J. Liao, H. Song, Y. Yang, C. Guan, and Z. Zhang, "A Biochar-Based Route for Environmentally Friendly Controlled Release of Nitrogen: Urea-Loaded Biochar and Bentonite Composite," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, Jul., pp. 1-12, 2019

[3] S. H. Chien, L. I. Prochnow, and H. Cantarella, "Chapter 8 Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts," *Advances in Agronomy*, pp. 267–322, 2009

[4] D. Kanjana, "Advancement of Nanotechnology Applications on Plant Nutrients Management and Soil Improvement," *Springer eBooks*, Jan., pp. 209–234, 2017

[5] Y. Li et al., "Synthesis and performance of bio-based epoxy coated urea as controlled release fertilizer," *Progress in Organic Coatings*, vol. 119, Jun., pp. 50–56, 2018

[6] A. Lateef et al., "Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: An environment friendly slow release fertilizer," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 232, Sep., pp. 174–183, 2016

[7] K. Lubkowski, "COATING FERTILIZER GRANULES WITH BIODEGRADABLE MATERIALS FOR CONTROLLED FERTILIZER RELEASE," *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 2573–2581, 2014

[8] H. Bian, L. Wei, C. Lin, Q. Ma, H. Dai, and J. Y. Zhu, "Lignin-Containing Cellulose Nanofibril-Reinforced Polyvinyl Alcohol Hydrogels," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 6, no. 4, Mar., pp. 4821–4828, 2018

[9] F. Ding, Y. Zou, S. Wu, and X. Zou, "Self-healing and tough hydrogels with conductive properties prepared through an interpenetrating polymer network strategy," *Polymer*, Aug., p. 122907, 2020

[10] Erizal and Zainal Abidin, "Sintesis Hidrogel Campuran Poli (Vinil Alkohol) (PVA)— Natrium Alginat dengan Kombinasi Beku-Leleh dan Radiasi Gamma untuk Bahan Pembalut Luka," *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, vol. 7, no. 1, Sep. 2013

[11] R. V. Gadhave and P. T. Gaddekar, "Glyoxal Cross-Linked Polyvinyl Alcohol-Microcrystalline Cellulose Blend as a Wood Adhesive with Enhanced Mechanical, Thermal and Performance Properties," *Mater. Int.*, vol. 2, no. 3, pp. 277–285, 2020

[12] K. Wang et al., "Chemically Crosslinked Hydrogel Film Leads to Integrated Flexible Supercapacitors with Superior Performance.," *Advanced Materials*, vol. 27, no. 45, Dec., pp. 7451–7, 2015

[13] P. J. P. Espitia, W.-X. Du, R. de J. Avena-Bustillos, N. de F. F. Soares, and T. H. McHugh, "Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties - A review," *Food Hydrocolloids*, vol. 35, Mar., pp. 287–296, 2014

- [14] I. Zaman, B. Manshoor, A. Khalid, and S. Araby, "From clay to graphene for polymer nanocomposites—a survey," *Journal of Polymer Research*, vol. 21, no. 5, Apr. 2014
- [15] P. Mazumdar, Sree Kumar Chockalingam, S. Rattan, and Bipin Kumar Gupta, "Tunable Mechanical, Electrical, and Thermal Properties of Polymer Nanocomposites through GMA Bridging at Interface," *ACS omega*, vol. 3, no. 4, Apr., pp. 3675–3687, 2018
- [16] B. Vigolo, P. Poulin, M. Lucas, P. Launois, and P. Bernier, "Improved structure and properties of single-wall carbon nanotube spun fibers," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 7, Aug., pp. 1210–1212, 2002
- [17] A. B. Dalton et al., "Continuous carbon nanotube composite fibers: properties, potential applications, and problems Electronic supplementary information (ESI) available: frontispiece figure. See <http://www.rsc.org/suppdata/jm/b3/b312092a/>," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 14, no. 1, pp. 1–1, Jan. 2004, doi: <https://doi.org/10.1039/b312092a>.
- [18] K. Thor, "Calcium—Nutrient and Messenger," *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, Apr. 2019
- [19] P. J. WHITE, "Calcium in Plants," *Annals of Botany*, vol. 92, no. 4, Oct., pp. 487–511, Oct. 2003
- [20] R. Hänsch and R. R. Mendel, "Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl)," *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 12, no. 3, Jun., pp. 259–266, 2009
- [21] R. F. Brennan, J. D. Armour, and D. J. Reuter, "Diagnosis of Zinc Deficiency," *Zinc in Soils and Plants*, pp. 167–181, 1993
- [22] A. Shaviv, S. Raban, and E. Zaidel, "Modeling Controlled Nutrient Release from Polymer Coated Fertilizers: Diffusion Release from Single Granules," *Environmental Science & Technology*, vol. 37, no. 10, May., pp. 2251–2256, 2003
- [23] N. Haryati, "Sintesis Dan Karakterisasi Hidrogel Berbasis PVA/POM/GA/CNT sebagai Material *Slow-Controlled Release Fertilizer*", Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, 2016.
- [24] Fitri Khoerunnisa et al., "Chitosan/PEG/MWCNT/Iodine composite membrane with enhanced antibacterial properties for dye wastewater treatment," *Journal of environmental chemical engineering*, vol. 8, no. 2, Apr., pp. 103686–103686, 2020
- [25] R. Rudra, V. Kumar, and P. P. Kundu, "Acid catalysed cross-linking of poly vinyl alcohol (PVA) by glutaraldehyde: effect of crosslink density on the characteristics of PVA membranes used in single chambered microbial fuel cells," *RSC Advances*, vol. 5, no. 101, pp. 83436–83447, 2015
- [26] T. Mehrotra, M. N. Zaman, B. B. Prasad, A. Shukla, S. Aggarwal, and R. Singh, "Rapid immobilization of viable *Bacillus pseudomycoloides* in polyvinyl alcohol/glutaraldehyde hydrogel for biological treatment of municipal wastewater," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 9, Jan., pp. 9167–9180, Jan. 2020
- [27] Y. Zhang and L. Ye, "Structure and property of polyvinyl alcohol/precipitated silica composite hydrogels for microorganism immobilization," *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, Jan., pp. 749–755, 2014
- [28] M. Theodore, M. Hosur, J. Thomas, and S. Jeelani, "Influence of functionalization on properties of MWCNT–epoxy nanocomposites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 3, Jan., pp. 1192–1200, 2011
- [29] J. A. Kim, D. G. Seong, T. J. Kang, and J. R. Youn, "Effects of surface modification on rheological and mechanical properties of CNT/epoxy composites," *Carbon*, vol. 44, no. 10, Aug., pp. 1898–1905, 2006
- [30] F. Behdarvand, E. Valamohammadi, M. A. Tofighy, and T. Mohammadi, "Polyvinyl alcohol/polyethersulfone thin-film nanocomposite membranes with carbon nanomaterials incorporated in substrate for water treatment," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 1, Feb., p. 104650, 2021
- [31] B. W. Chieng, N. A. Ibrahim, N. Ahmad Daud, and Z. A. Talib, "Functionalization of Graphene Oxide via Gamma-Ray Irradiation for Hydrophobic Materials," *Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials*, pp. 177–203, 2019
- [32] S. Gholami, J. Llorens, Vahid Vatanpour, A. Dehqan, Shadi Paziresh, and José Luis Cortina, "Impact of a new functionalization of multiwalled carbon nanotubes on antifouling and permeability of PVDF nanocomposite membranes for dye wastewater treatment," *Chemosphere*, vol. 294, May., pp. 133699–133699, 2022
- [33] A. D. Putri, "Sintesis, Karakterisasi, dan Uji Kinerja Biohidrogel Berbahan Dasar DYT-PVA dengan Crosslinker Glutaraldehyd," Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, 2013
- [34] S. Vural, K. B. Dikovics, and D. M. Kalyon, "Cross-link density, viscoelasticity and swelling of hydrogels as affected by dispersion of multi-walled carbon nanotubes," *Soft Matter*, vol. 6, no. 16, p. 3870, 2010
- [35] Erizal Erizal and Anik Sunarni, "SINTESIS HIDROGEL SUPERABSORBENT POLI(AKRILAMIDA-KO-ASAMAKRILAT) DENGAN TEKNIK IRADIASI DAN KARAKTERISASINYA," *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 11, no. 1, Oct., pp. 15–21, 2009
- [36] Mahati Chintapalli et al., "Relationship between Conductivity, Ion Diffusion, and Transference Number in Perfluoropolyether Electrolytes," *Macromolecules*, vol. 49, no. 9, Apr., pp. 3508–3515, 2016
- [37] Mohammed Jard Kadhim and Maher Ibraheem Gamaj, "Estimation of the Diffusion Coefficient and Hydrodynamic Radius (Stokes Radius) for Inorganic Ions in Solution Depending on Molar Conductivity as Electro-Analytical Technique-A Review," *Journal of chemical reviews*, vol. 2, no. 3, Jun., pp. 182–188, 2020

